

大型水利工程金属结构启闭机施工中的焊接工艺优化与缺陷预防

徐征 陈汉 赵鑫 晏建银 焦世龙

江苏省水利机械制造有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6624

[摘要] 大型水利工程中,启闭机作为金属结构核心组成部分,承担着闸门启闭、水流调控等关键功能,其焊接质量直接决定工程运行安全性与耐久性。当前,启闭机焊接施工中仍存在工艺适配性不足、参数控制不精准、缺陷防控不到位等问题,易引发裂纹、气孔、未焊透、夹渣等焊接缺陷,这些缺陷不仅会降低结构承载能力,还可能在长期服役中逐步扩展,最终导致设备故障甚至工程事故。本文结合启闭机结构特点与水利工程严苛服役环境,分析焊接工艺在材料适配、参数控制、环境适应等方面的核心问题,系统提出焊接工艺优化路径,为提升启闭机焊接施工质量、保障水利工程长期稳定运行提供理论参考与实践指导。

[关键词] 大型水利工程; 启闭机; 焊接工艺优化; 缺陷预防; 金属结构

中图分类号: TV5 **文献标识码:** A

Optimisation of Welding Processes and Defect Prevention in Hoist Construction for Large-Scale Hydraulic Engineering Metal Structures

Zheng Xu Han Chen Xin Zhao Jianyin Yan Shilong Jiao

Jiangsu Province Water Conservancy Machinery Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] In large-scale hydraulic engineering projects, hoists serve as core components of metal structures, undertaking critical functions such as gate operation and water flow regulation. Their welding quality directly determines the operational safety and durability of the project. Currently, issues such as inadequate process adaptability, imprecise parameter control, and insufficient defect prevention persist in hoist welding construction. These can readily induce welding defects including cracks, porosity, lack of fusion, and slag inclusions. Such defects not only reduce structural load-bearing capacity but may also progressively propagate during long-term service, ultimately leading to equipment failure or even project accidents. This paper analyses core challenges in welding processes—including material compatibility, parameter control, and environmental adaptation—by integrating the structural characteristics of hoisting machinery with the demanding operational environment of hydraulic engineering. It systematically proposes an optimisation pathway for welding processes, providing theoretical reference and practical guidance to enhance welding construction quality and ensure the long-term stable operation of hydraulic engineering projects.

[Key words] large-scale hydraulic engineering; hoisting machinery; welding process optimisation; defect prevention; metal structures

引言

大型水利工程是国家基础设施建设的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、发电、航运等多重功能,对区域经济发展与生态安全具有深远影响。启闭机作为水利工程金属结构的关键设备,主要由闸架、卷筒、联轴器、制动器等部件构成,其通过焊接工艺实现各构件的连接成型,焊接接头的强度、韧性与密封性直接关系到设备运行可靠性。由于启闭机多服役于露天、潮湿、多介质腐蚀的复杂环境,且长期承受载荷、交变应力作用,对焊

接质量提出了极高要求。因此,针对启闭机焊接工艺进行系统性优化,建立科学完善的缺陷预防机制,对于提升金属结构施工质量、延长启闭机使用寿命、保障水利工程安全稳定运行具有重要现实意义。

1 大型水利工程启闭机焊接施工的核心特点与现存问题

1.1 启闭机焊接施工核心特点

启闭机金属结构多采用Q355B、Q460等高强度低合金钢,此

类材料焊接性较差,易出现冷裂纹、热影响区脆化等问题;结构件尺寸大、厚度大,多采用厚板焊接,焊接过程中热量输入不均匀,易产生较大焊接应力与变形;构件多为箱型、格构式结构,焊接接头形式复杂,包括对接接头、角接接头、T型接头等,部分区域焊接可达性差,增加了施工难度;服役环境严苛,需承受水压力、风载荷、温度变化等多重作用,对焊接接头的耐腐蚀性、抗疲劳性要求远高于普通结构。

1.2 焊接施工现存主要问题

(1) 工艺适配性不足且针对性欠缺。焊接工艺方案多为通用模板套用,未结合启闭机高强度钢材料特性、厚板结构特点及复杂接头形式进行个性化设计。例如高强度钢焊接时未匹配对应的预热工艺与低氢型焊材,易引发冷裂纹与接头韧性下降;厚板焊接仍依赖单一手工电弧焊,未采用复合焊接工艺,导致焊接效率低且质量稳定性差,难以满足严苛服役环境对焊接接头的性能要求。(2) 参数控制精准度不足且动态调节缺失。焊接电流、电压、焊接速度及热输入量等关键参数多依赖焊工经验静态设定,缺乏基于构件厚度、焊接位置、环境温度的动态调整机制。参数过高易导致焊缝晶粒粗大、热影响区扩大及焊接变形加剧,参数过低则易引发未焊透、未熔合等缺陷;多层多道焊过程中层间温度缺乏实时监测与精准控制,进一步加剧应力集中,增加裂纹产生风险。(3) 环境影响防控体系薄弱且应对不足。露天焊接作业未搭建标准化防护设施,防风、防雨、防潮措施不到位,空气湿度超标或风速过大易导致焊缝产生气孔、夹渣等缺陷;低温环境下未实施专项预热与保温方案,构件焊接区域温度骤降引发冷裂纹;焊接场地清理不彻底,粉尘、杂物等易侵入焊接熔池,破坏熔池稳定性,进一步增加缺陷产生概率。(4) 过程质量管控流于形式且细节疏漏。焊接前坡口加工精度不足、表面清理不彻底,坡口边缘存在油污、铁锈、氧化皮等杂质,直接影响焊缝熔合质量;焊接过程中操作规范性不足,如运条速度不均、摆动幅度失控、焊条角度偏差等,易导致焊缝成形不良;层间清理不到位,未及时清除焊渣与飞溅物,易引发层间夹渣缺陷;关键焊缝未执行全程跟踪监管,难以实时纠正违规操作,导致质量问题累积^[1]。

2 大型水利工程启闭机焊接工艺优化路径

2.1 焊接材料与工艺精准适配优化

立足启闭机高强度钢的焊接特性,构建三位一体适配体系。高强度钢焊接优先选用低氢型焊条或低氢型药芯焊丝,严格遵循焊材与母材强度、韧性匹配原则,同时建立焊材全生命周期管控流程,低氢型焊条需经350~400℃烘干保温2~3小时,采用专用保温桶随取随用,杜绝受潮引发气孔缺陷。结合构件结构类型与施工场景优化焊接方法组合,厚板对接接头采用熔化极气体保护焊(MAG)打底与埋弧焊填充盖面复合工艺,既保证根部成形质量,又提升焊接效率;T型接头、角接接头及薄壁构件采用二氧化碳气体保护焊,利用其电弧集中、飞溅量少、成形美观的优势,减少后续打磨工作量;复杂狭小区域及可达性差的部位,采用半自动气体保护焊配合定制化焊接工装,提升操作灵活性与接头

成形一致性^[2]。

2.2 焊接参数动态智能调控优化

建立基于构件特性的参数动态优化模型,根据材料厚度、接头形式、焊接位置及环境温度,预设多套基准参数区间,如Q355B钢20mm厚对接接头埋弧焊参数:电流500~600A、电压32~36V、焊接速度3~4mm/s,热输入量严格控制在25~35kJ/cm。引入智能化焊接参数控制系统,通过传感器实时采集电流、电压、焊接速度及温度数据,与标准参数阈值对比,自动调节设备运行参数,确保焊接过程参数稳定可控。针对不同焊接位置优化参数适配策略,平焊时采用中高速度提升效率,立焊时适当降低电流10%~15%、减缓焊接速度,增加电弧电压保证焊缝成形均匀;多层多道焊过程中,通过红外测温仪实时监测层间温度,确保层间温度维持在100~150℃,避免温度过高导致晶粒粗大或温度过低引发应力裂纹,实现参数与焊接工况的精准匹配。

2.3 焊接工艺过程精细化优化

优化坡口设计与加工工艺,厚板对接采用X型或双U型坡口,减少焊接填充量与变形量,坡口角度控制在60~70°,钝边厚度2~3mm,装配间隙2~4mm,采用机械加工替代气割工艺,保证坡口边缘平整无毛刺、氧化皮。焊接前采用喷砂或机械打磨方式,彻底清理坡口及两侧20mm范围内的油污、铁锈、水分等杂质,清理后及时进行焊接作业,避免二次污染。制定科学的焊接顺序与工装固定方案,大型构件采用对称焊接、分段退步焊及跳焊工艺,减少焊接残余应力与变形;箱型结构执行先内部后外部、先对接后角接、先主焊缝后次要焊缝的焊接顺序,规避内部焊缝焊接受限问题。焊接前安装刚性固定工装与防变形支撑,焊接完成后待构件冷却至室温再拆除工装,必要时采用焊后消应力热处理,降低应力集中风险。同时规范操作手法,控制焊条摆动幅度,对接接头摆动幅度不超过焊条直径的3~4倍,角接接头确保焊脚高度符合设计要求,避免未焊透、咬边等缺陷。

2.4 焊接环境适应性系统优化

搭建标准化焊接作业防护棚,配备智能防风、防雨、防尘及温湿度调控设备,确保作业环境风速 $\leq 2\text{m/s}$ 、相对湿度 $\leq 80\%$ 、环境温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 。低温环境焊接时,采用电加热或火焰加热方式对构件进行整体预热,预热温度根据材料特性控制在100~150℃,焊接区域采用保温棉覆盖保温,焊接完成后实施后热保温措施,缓慢冷却至室温,杜绝冷裂纹产生。高温季节焊接时,合理调整作业时段,避开正午高温时段,采用强制通风与降温设备降低作业环境温度,防止焊材性能衰减与焊工操作疲劳;潮湿多雨天气加强焊材储存环境除湿,采用烘干后的焊材,必要时在焊接区域设置除湿装置,确保焊接过程熔池稳定。同时规范焊接场地管理,划分作业区与物料区,及时清理粉尘、杂物,避免杂质侵入熔池引发夹渣缺陷。

3 启闭机焊接缺陷全流程预防体系构建

3.1 强化焊接前准备管控

建立严格的焊前技术交底制度,针对具体构件的焊接工艺方案、参数要求、操作要点对焊工进行专项培训与考核,考核合

格后方可上岗作业;加强焊材全流程管理,建立焊材入库、烘干、发放、回收台账,确保焊材使用符合规范;对焊接设备进行全面检修与校准,包括焊机、测温仪、流量计等,确保设备性能稳定可靠;对构件装配质量进行检验,重点检查坡口尺寸、装配间隙、错边量等,超标部位及时整改,避免带缺陷进入焊接工序。

3.2 加强焊接过程实时监控

搭建人工监管与智能监测双轨过程控制机制。推行关键焊缝焊接全程旁站监督制度,安排专职技术人员跟踪作业流程,重点核查参数执行、操作规范、层间清理等关键环节,及时纠正运条速度不均、摆动幅度失控等违规操作,确保工艺标准落地。引入智能化监测技术提升管控精准度,通过电弧传感设备实时采集焊接电流、电压数据,与预设标准阈值对比,出现异常自动预警并联动设备调整;采用红外热像仪动态监测焊接温度场分布,精准控制多层多道焊层间温度,避免温度波动引发缺陷;对大型复杂构件焊接过程进行视频记录,便于后续质量追溯与问题复盘。实施分层检验与节点把关机制,每道焊缝完成后焊工先进行外观自检,合格后提交检验人员复检,重点检查焊缝成形、表面缺陷及尺寸偏差;多层焊每层焊接完成后,必须彻底清除焊渣与飞溅物,经检验合格后方可进行下一层焊接;关键节点完成后,需进行超声波探伤抽检,合格后方可继续施工,杜绝缺陷累积^[3]。

3.3 完善焊接质量检验机制

建立分级分类检测体系,依据焊缝重要程度划分检测等级。关键受力焊缝执行100%超声波检测+20%射线检测,一般焊缝执行100%外观检测+50%超声波检测,确保缺陷全面排查。外观检测采用焊缝量规测量焊脚高度、余高及咬边深度,严格符合设计要求;内部检测采用超声波探伤排查裂纹、未焊透等缺陷,射线探伤重点检测气孔、夹渣等体积型缺陷,检测结果需满足相关标准。构建缺陷整改闭环机制,对检测发现的缺陷详细记录位置、类型、尺寸及成因,建立缺陷台账;根据缺陷性质制定针对性整改方案,裂纹缺陷需采用碳弧气刨彻底清除,打磨后进行渗透检测确认无残留缺陷,再按工艺标准重新焊接;返修焊缝需扩大检测范围,确保整改彻底,不合格严禁放行^[4]。建立质量复盘与持续改进机制,定期汇总焊接缺陷数据,分析共性问题与高频缺陷成因,针对性优化工艺方案与管控措施;每月召开质量分析会,分享优秀操作案例与典型失误教训,推动焊工技能提升;将焊接质量纳入绩效考核体系,对无缺陷作业焊工给予奖励,对反复出现质量问题的人员进行再培训或调岗,形成良性循环,持续提升焊接质量水平。

3.4 强化组织管理与技术支撑

完善组织保障体系,成立焊接质量专项管理小组,明确技术、施工、检验等各岗位职责分工,形成统一协调、分级负责的管理格局;制定焊接质量应急预案,针对突发缺陷、设备故障等问题制定处置流程,确保快速响应、妥善处理,减少对施工进度的影响。加强技术支撑能力建设,组建专业焊接技术团队,负责工艺优化、难题攻关及现场指导,针对新型材料、复杂结构焊接开展专项技术研究;建立焊接技术知识库,整合工艺标准、操作规范、缺陷案例等资料,为施工人员提供便捷的技术参考;定期开展行业技术交流,引进先进焊接技术与管理经验,推动工艺水平迭代升级。强化全流程文档追溯管理,建立焊接施工完整技术档案,涵盖工艺文件、焊材台账、检测报告、整改记录等资料,确保每道焊缝可追溯、可核查;项目竣工后对焊接质量数据进行全面分析,形成质量评估报告,为后续同类工程施工提供借鉴,实现焊接质量管控的持续提升^[5]。

4 结束语

大型水利工程启闭机焊接施工质量直接关系到工程整体安全与运行效能,其焊接工艺的复杂性与服役环境的严苛性,决定了必须通过系统性优化与全流程防控保障焊接质量。科学的焊接工艺优化能够有效提升焊接接头性能,减少焊接缺陷产生,而完善的缺陷预防体系则能实现质量风险的精准管控,两者结合可显著提升启闭机焊接施工质量。未来,需加强行业技术交流与经验推广,推动焊接工艺标准的完善与落地,为大型水利工程金属结构施工质量提升提供更强有力的技术支撑,保障水利工程长期稳定运行与安全服役。

[参考文献]

- [1]千娜,冯程,王世龙.黄荆口水库工程金属结构设备布置与设计[J].中国机械,2023,(15):24-27.
- [2]张亚宜,刘有飞.王家崖水库工程金属结构问题及改造措施分析[J].陕西水利,2022,(06):173-175.
- [3]孔垂雨,洪伟,张海龙.水利工程启闭机事中事后监管的现状与思考[J].水利技术监督,2022,(06):9-12.
- [4]卢剑华.实时在线监测系统在水利水电工程金属结构设备的应用[J].红水河,2020,39(05):41-43+47.
- [5]丛景春,罗华.龙桥水利水电枢纽工程金属结构设计[J].湖北水力发电,2007,(S1):36-39.

作者简介:

徐征(1979—),男,汉族,江苏扬州人,本科,现有职称:工程师,研究方向或主要从事工作:水利工程。